



Оценка эффективности обработки при точении с использованием экологически чистых наножидкостей на основе оксида меди

Джаввади Эшвара Маниканта^{1, a}, Нитин Амбхор^{2, b, *}, Кришина Бирудугадда Мурти^{3, c},
Гопала Рао Теллапутта^{4, d}, Девендра Агравал^{5, e}

¹ Женский инженерный колледж Шри Вишну (А), Бхимаварам, Андхра-Прадеш, 534202, Индия

² Технологический институт Вишвакармы, Махараштра, Пуна, 411037, Индия

³ Институт технологий и инженерии Саси, Тадепаллигудем, 534101, Индия

⁴ Инженерно-технологический колледж Св. Анны, Чирала, Андхра-Прадеш, 523187, Индия

⁵ Инженерный колледж, Малегаон Будрук, Барамати, Махараштра, Пуна, 413115, Индия

^a <https://orcid.org/0000-0002-0881-4899>, manijem66@gmail.com; ^b <https://orcid.org/0000-0001-8468-8057>, nitin.ambhore@vit.edu;

^c <https://orcid.org/0009-0007-4457-0266>, bkmurthy@sasi.ac.in; ^d <https://orcid.org/0000-0001-5622-4140>, drtgopalrao@gmail.com;

^e <https://orcid.org/0000-0002-2477-1841>, dpagrawal@engg.svpm.org.in

ИНФОРМАЦИЯ О СТАТЬЕ

УДК 621.895

История статьи:

Поступила: 22 июля 2025

Рецензирование: 22 августа 2025

Принята к печати: 09 сентября 2025

Доступно онлайн: 15 декабря 2025

Ключевые слова:

Оксид меди

Наножидкость

Высокоскоростное точение

Минимальное количество смазочно-охлаждающей жидкости (MQL)

Экологическая устойчивость

АННОТАЦИЯ

Введение. В настоящее время наблюдается растущий спрос на экологически чистые смазочно-охлаждающие жидкости (СОЖ) для обработки материалов резанием, что обусловлено их нетоксичностью, устойчивостью, высокой эффективностью и способностью улучшать качество поверхности. Эти жидкости поддерживают принципы экологичного производства и обеспечивают безопасную рабочую среду. Наножидкости на основе оксида меди обеспечивают повышенную теплопередачу, безопасность, а также снижают износ инструмента и силы резания. **Цель работы.** Настоящее исследование посвящено оценке эффективности СОЖ на основе оксида меди в процессах точения с целью поддержания устойчивого и экологически осознанного производства. В работе исследуется точение стали SS 304 с использованием наножидкостей с разной концентрацией оксида меди. **Методы исследования.** В данном исследовании процесс точения испытывался в различных условиях обработки с использованием СОЖ, содержащей разные концентрации наночастиц оксида меди (0,3, 0,6, 0,9, 1,2 и 1,5 %). В качестве базового масла выбрано кукурузное масло, в котором были диспергированы наночастицы оксида меди. Испытания по обработке проводились в различных условиях: сухое точение, мокрое точение, точение в условиях использования минимального количества смазочно-охлаждающей жидкости (MQL) и MQL с наномодификацией (nMQL). Был проведен сравнительный анализ для оценки температуры резания и сил резания. **Результаты и обсуждение.** Результаты показали, что применение 1,2%-ной наножидкости оксида меди привело к значительному снижению силы резания и температуры резания, приблизительно на 17,54 и 29,53 % соответственно, по сравнению с обработкой в условиях сухого точения и традиционного мокрого точения. Кроме того, отмечено, что наножидкость участвует в образовании защитной пленки на границе раздела «инструмент – заготовка», что снижает износ инструмента. Эти результаты подчеркивают потенциал экологически чистых СОЖ на основе оксида меди для повышения эффективности операций точения и содействия экологически устойчивым методам.

Для цитирования: Оценка эффективности обработки при точении с использованием экологически чистых наножидкостей на основе оксида меди / Д.Э. Маниканта, Н. Амбхор, К.Б. Мурти, Г.Р. Теллапутта, Д. Агравал // Обработка металлов (технология, оборудование, инструменты). – 2025. – Т. 27, № 4. – С. 6–15. – DOI: 10.17212/1994-6309-2025-27.4-6-15.

Введение

В традиционных операциях механической обработки обычно используются смазочно-охлаждающие жидкости (СОЖ) на синтетической

основе, которые снижают трение и повышают эффективность процессов обработки за счет охлаждения и смазки [1]. Однако эти жидкости вызывают серьезные экологические проблемы и создают угрозу здоровью рабочих из-за их токсичности [2]. Следовательно, существует растущий спрос на подходы, обеспечивающие экологически рациональное производство, которые уменьшают или исключают применение тра-

*Адрес для переписки

Амбхор Нитин, к.т.н., доцент

Технологический институт Вишвакармы,

Пуна, 411037, Махараштра, Индия

Тел.: +91-2026950441, e-mail: nitin.ambhore@vit.edu

диционных СОЖ [3]. Многообещающей альтернативой в указанном направлении является технология обработки с использованием минимального количества смазочно-охлаждающей жидкости (MQL – minimum quantity lubrication). В этом случае СОЖ доставляет небольшое контролируемое количество смазки, смешанной со сжатым воздухом, непосредственно в зону резания, обеспечивая тем самым как экологические, так и экономические преимущества [4–5]. Данный метод не только снижает потребление СОЖ, но и улучшает производительность обработки [6].

Недавние исследования показали, что добавление наночастиц в биоразлагаемые растительные масла в системах MQL значительно повышает производительность резания, устранив при этом риски для здоровья и окружающей среды [7]. Было показано, что наночастицы, например, графена, уменьшают износ инструмента и улучшают качество поверхности во время операций обработки [8]. Так, авторы работ [9, 10] сообщили о лучших результатах обработки при использовании СОЖ с nano-SiO₂ по сравнению с обычными системами. Аналогичным образом Емами и др. (Emami et al.) [11] наблюдали улучшение характеристик шлифования керамики с использованием технологии MQL. В другом случае СОЖ на основе растительных масел в системах MQL продемонстрировали увеличение срока службы инструмента и улучшение качества поверхности при обработке сплавов семейства инконель [12]. Исследования с применением различных растительных масел, таких как подсолнечное и масло дерева Ним, при использовании по технологии MQL также показали улучшенные характеристики обработки [13].

Во время резки металла часто повышается температура режущей кромки инструмента, что ускоряет его износ и времяостояния оборудования. Выбор правильной СОЖ и технологии смазки имеет большое значение для уменьшения этих эффектов и продления срока службы инструмента [14]. Исследователи обнаружили, что наножидкости улучшают как рассеивание тепла, так и смазывающую способность благодаря превосходной смачивающей способности и теплопроводности [15]. Эстель и др. (Estelle et al.) [16] изучили наножидкости на водной основе с добавлением углеродных нанотрубок и обнаружи-

ли повышенную теплопроводность и вязкость. Мия и др. (Mia et al.) [17] сравнили резание без СОЖ, резание с традиционной СОЖ и резание по технологии MQL при обработке закаленной стали и наблюдали меньшие силы резания при использовании технологии MQL. В другом исследовании создание экстремального давления (EP) при подаче СОЖ на основе растительных масел снижало силы резания во время обработки стали AISI 304L, хотя более высокое экстремальное давление (EP) приводило к увеличению шероховатости поверхности. Тем не менее СОЖ на основе растительных масел по-прежнему считались эффективной альтернативой опасным нефтяным жидкостям.

Срикант и др. (Srikant et al.) [18] продемонстрировали, что наножидкости на основе оксида меди в водных системах значительно снижают температуру кончика инструмента благодаря улучшенным возможностям отвода тепла. Падмини и др. (Padmini et al.) [19] также подтвердили трибологические и тепловые преимущества правильно составленных наножидкостей при резке металла. Шривастава и Гангопадхяя (Shrivastava and Gangopadhyay) [20] провели испытания в условиях микросверления с подачей сжатого воздуха, по технологиям MQL с чистым растительным маслом и MQL с растительным маслом, модифицированным наноалмазами. Наилучшие результаты были достигнуты при использовании смеси с 2,0 об. % наноалмазов. Азами и др. (Azami et al.) [21] наблюдали улучшение характеристик фрезерования с растительным маслом, содержащим 0,1 масс. % наночастиц графена (GnP) по сравнению с чистым маслом.

Шарма и др. (Sharma et al.) [22] акцентировали внимание на применении MQL на основе наножидкостей для обработки сверхтвердых материалов. Маниканта и др. (Manikanta et al.) в работе [23] сообщили, что скорость удаления материала и качество поверхности при обработке SS 304 в значительной степени зависят как от скорости резания, так и от концентрации наножидкости. Вирди и др. (Viridi et al.) в [24] продемонстрировали улучшение качества поверхности и снижение температуры при шлифовании сплава Ni-Cr с использованием технологии MQL и наножидкости, содержащей 0,5–1 масс. % CuO. Гаурав и др. (Gaurav et al.) в [25] оценили наножидкости

на основе масла жожоба при обработке титана в условиях MQL и наблюдали уменьшение сил резания и улучшение качества выходных параметров благодаря лучшему охлаждению и смазке.

Обзор литературы показал, что исследователи изучили использование различных наножидкостей в машинной обработке. Применение наножидкостей с добавкой оксида меди при точении оказалось ограниченным. **Целью исследования** является изучение влияния различных концентраций в наножидкостях оксида меди (CuO) при резании без СОЖ, резании с традиционной СОЖ и резании с использованием технологии MQL.

Методы

В качестве заготовок для проведения исследований выбрали прутки из нержавеющей стали. Обработка проводилась на токарном станке Turn Master 3 со следующими параметрами: скорость 900 об/мин, подача 80 мм/мин и глубина резания 0,30 мм в соответствии со стандартными спецификациями станка.

Операция точения выполнялась в четырех условиях: без СОЖ, с традиционной СОЖ, с использованием технологии MQL, а также технологии MQL с наномодификацией. При реализации точения с подачей СОЖ применяли коммерчески доступную традиционную смазочно-охлаждающую жидкость. В случае точения в условиях MQL небольшое количество СОЖ подавалось со скоростью потока 450 мл/час. В экспериментах, предусматривавших наноСОЖ, использовали экологически чистую СОЖ на основе кукурузного масла, в которую были введены наночастицы оксида меди в концентрациях 0,3, 0,6, 0,9, 1,2

и 1,5 % по объему. Во время операции обработки с помощью цифрового пиromетра измеряли температуру на режущей кромке инструмента. Пьезоэлектрический динамометр использовали для измерения сил резания, возникающих во время операций точения.

Процесс диспергирования проводили при различных весовых концентрациях CuO . На рис. 1 представлено изображение наночастиц оксида меди, использованных в исследовании, полученное с помощью сканирующего электронного микроскопа с полевой эмиссией (FESEM).

Для достижения однородности смеси применялось магнитное перемешивание с целью равномерного распределения наночастиц по всему объему базовой жидкости. Более того, для улучшения стабильности дисперсии и предотвращения агломерации наночастиц добавляли лаурилсульфат натрия (LSS) в количестве, равном 0,1 % от веса наночастиц. На рис. 2 показан внешний вид приготовленных наножидкостей на основе оксида меди.

Результаты и их обсуждение

Чрезмерные силы резания при точении могут ускорить износ инструмента, сократить срок его службы, увеличить потребность в частой замене инструмента и ухудшить качество поверхности из-за вибрации и дрожания. На рис. 3 показаны силы резания, зарегистрированные в различных условиях обработки, включая точение без СОЖ, традиционное точение (с подачей СОЖ), в условиях MQL и MQL с наномодификацией, а также с использованием различных СОЖ, таких как традиционная СОЖ, экологически чистая СОЖ и экологически чистая СОЖ, смешанная с наночастицами оксида меди в концен-

Характеристики экспериментальной установки

Experimental setup details

Параметр / Parameter	Описание / Description
Металлорежущий станок / Machine tool	Центральный токарный станок Turn-master-35, (Kirloskar) / Center lathe machine, Turn-master-35, (Kirloskar)
Материал заготовки / Workpiece material	Сплав SS 304 / SS 304 alloy
Размер заготовки / Workpiece size	Диаметр 50 мм; длина 200 мм / 50 mm diameter, 200 mm length
Державка / Tool holder	PSBNR2525 M-12
Режущий инструмент / Cutting tool	SNMG 120408 NSU (твердый сплав с покрытием) / SNMG 120408 NSU (coated carbide)

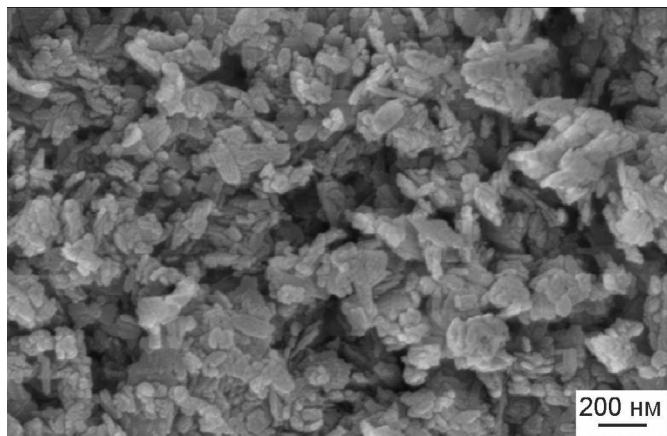


Рис. 1. СЭМ-изображение наночастиц оксида меди

Fig. 1. SEM image of copper oxide nanoparticles



Рис. 2. Наножидкости на основе оксида меди

Fig. 2. Copper oxide-based nanofluids

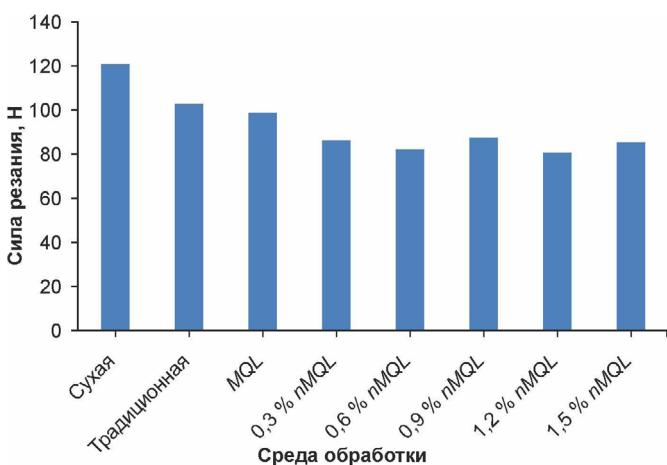


Рис. 3. Силы резания при обработке в различных средах

Fig. 3. Cutting forces under different machining environments

трациях 0,3, 0,6, 0,9, 1,2 и 1,5 масс. %. Наибольшая сила резания, 120,7 Н, была обнаружена в условиях точения без СОЖ из-за отсутствия смазки. Напротив, традиционная обработка с подачей СОЖ и использованием традиционной СОЖ привела к снижению силы резания до

103,2 Н. Дополнительное снижение было отмечено в условиях MQL с традиционной СОЖ, где измеренная сила резания составила 99,2 Н. Применение наножидкостей на основе оксида меди в условиях MQL привело к дальнейшему снижению сил резания, что указывает на улучшение смазывания и снижение трения между инструментом и заготовкой.

Использование наножидкости с добавлением 0,3 масс. % CuO привело к снижению силы резания до 86,7 Н в зоне резания. Дальнейшее увеличение концентрации CuO до 0,6, 0,9 и 1,2 масс. % привело к еще большему снижению сил резания до 82,8, 87,7 и 81,3 Н соответственно по сравнению с условиями 0,3 масс. %. Это прогрессивное снижение было связано с улучшенным смазыванием, поскольку наночастицы образовывали стабильную смазочную пленку на поверхности заготовки, способствуя эффективному рассеиванию тепла. Улучшенная теплопроводность и смазывающие свойства при повышенных концентрациях CuO помогли уменьшить трение и снизить тепловыделение в зоне резания. Однако когда концентрация достигла 1,5 масс. %, сила резания увеличилась до 85,9 Н, что выше, чем наблюдалось при 1,2 масс. %. Это было связано с агломерацией наночастиц, которая негативно повлияла на стабильность дисперсии и снизила общую эффективность наножидкости.

Повышенные температуры резания ускоряют износ инструмента, размягчая его материал, что приводит к быстрому износу и значительному сокращению срока службы инструмента. Кроме того, высокие температуры могут негативно влиять на качество поверхности из-за термически индуцированных колебаний и нестабильности во время операции точения. В крайних случаях тепло, выделяемое во время резания, может изменить микроструктуру материала заготовки, потенциально ухудшив ее механические свойства, такие как твердость, предел прочности и распределение остаточных напряжений. На рис. 4 показаны температуры резания, зарегистрированные при различных условиях точения, включая точение без СОЖ, точение с традиционной СОЖ, точение с использованием технологии MQL и технологии наномодифицированной MQL. Испытания проводились с применением различных СОЖ, таких как традиционная СОЖ, экологически чистая СОЖ, а также СОЖ,

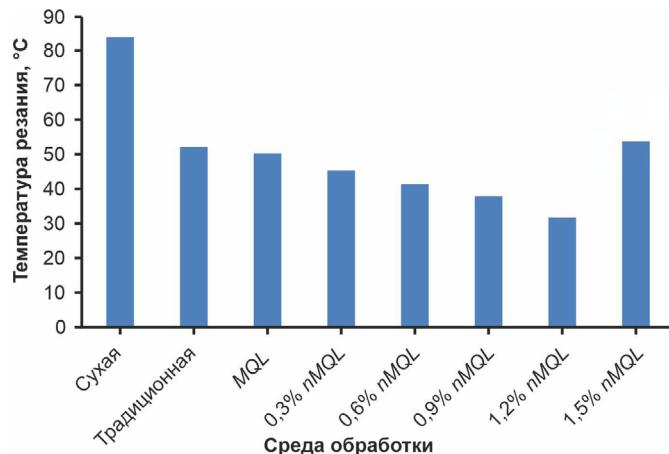


Рис. 4. Температура резания при обработке в различных средах

Fig. 4. Cutting temperature under different machining environments

модифицированная наночастицами оксида меди в концентрациях 0,3, 0,6, 0,9, 1,2 и 1,5 масс. %.

В режиме точения без СОЖ была отмечена самая высокая температура резания, 84 °C, что в первую очередь связано с отсутствием какой-либо охлаждающей среды. При использовании традиционной СОЖ (ТСОЖ) в условиях точения с подачей СОЖ температура резания снизилась до 52 °C. Дальнейшее снижение до 50 °C было зафиксировано при использовании MQL с экологически чистой СОЖ. Применение наножидкостей на основе оксида меди в условиях MQL продемонстрировало повышенную эффективность охлаждения, о чем свидетельствует значительное снижение температуры, зафиксированное во время операций точения. При применении наножидкости с 0,3 масс. % CuO температура резания на границе раздела «инструмент – стружка» заметно снизилась до 45 °C. По мере увеличения

концентрации CuO до 0,6, 0,9 и 1,2 масс. % зафиксированное снижение температуры составило 41, 38 и 32 °C соответственно по сравнению с базовым уровнем 0,3 масс. %. Это последовательное снижение температуры было в основном связано с улучшенной смазкой и более высокой теплопроводностью, обеспечиваемой наножидкостями. Распределенные наночастицы сформировали стабильную и прочную смазочную пленку на поверхности металла, а характерная высокая теплопроводность CuO способствовала быстрому рассеиванию тепла.

Кроме того, повышенная концентрация наночастиц обеспечивает дополнительную смазку, снижая силы трения и, следовательно, уменьшая тепловыделение. Однако при концентрации CuO 1,5 масс. % температура резания повысилась до 54 °C, что выше, чем наблюдалось при 1,2 масс. %. Это увеличение было связано с агломерацией наночастиц, которая негативно повлияла на стабильность дисперсии и снизила охлаждающую и смазывающую способность наножидкости.

На рис. 5 показан износ инструмента при различных условиях обработки.

Точение в условиях отсутствия СОЖ, точение с подачей СОЖ и точение в условиях наномодифицированного MQL оказывает заметное влияние на износ инструмента во время операций обработки, особенно при использовании наножидкостей. При точении без СОЖ отсутствие смазывания приводит к высоким температурам резания, ускоряя износ инструмента из-за термического напряжения и плохого удаления стружки. Точение с подачей СОЖ, чаще всего обычных поточных СОЖ, снижает температуру

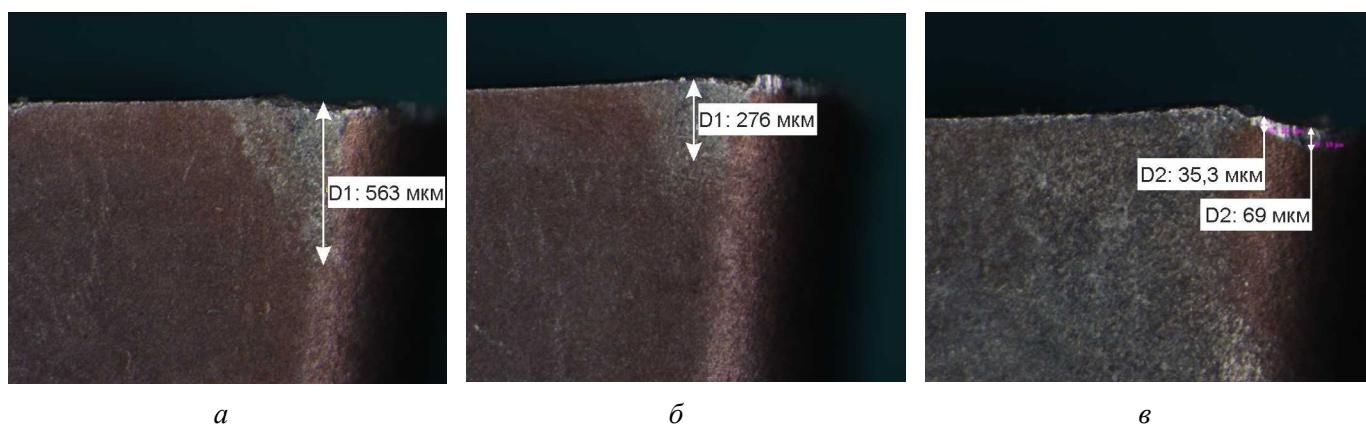


Рис. 5. Износ инструмента при обработке в условиях (a) сухого точения, (б) MQL и (в) nMQL

Fig. 5. Tool wear in (a) dry, (б) MQL, and (в) nMQL machining environments

и трение, но вызывает экологические проблемы и проблемы с утилизацией. MQL, особенно в сочетании с биоразлагаемыми наножидкостями, содержащими наночастицы, такие как оксид меди, представляет собой экологически безопасную альтернативу. Эти наножидкости улучшают смазку и теплопроводность, образуя защитную пленку на границе раздела «инструмент – заготовка», что снижает абразивный, адгезионный и диффузионный износ. В результате MQL с наножидкостями значительно снижает износ инструмента по сравнению с сухим и даже традиционным точением с подачей СОЖ, увеличивая срок службы инструмента и повышая производительность обработки.

Заключение

В этом исследовании было проведено изучение СОЖ на основе кукурузного масла с переменными концентрациями наночастиц оксида меди. Представлена сравнительная оценка различных условий точения, таких как точение без СОЖ, точение с подачей СОЖ и MQL. Результаты показывают, что добавление наночастиц оксида меди в концентрациях 0,3, 0,6, 0,9, 1,2 и 1,5 % в экологически чистую СОЖ на основе кукурузного масла заметно улучшило характеристики обработки в рассмотренных условиях. Использование MQL с экологически чистой СОЖ, модифицированной оксидом меди, привело к заметному снижению как силы резания, так и температуры резания, что способствует увеличению срока службы инструмента. Наилучшие результаты были получены при концентрации 1,2 масс. % CuO, в этом случае были зарегистрированы самые низкие значения силы резания и температуры. В качестве идеальной смазки для улучшения обрабатываемости и снижения износа инструмента предлагается использовать СОЖ с добавлением 1,2 % CuO и выполнять точение в условиях MQL. Эти результаты будут полезны для мониторинга процесса в реальном времени с использованием простого контроллера для поддержания силы и температуры резания в пределах целевых значений.

Список литературы

1. Sustainable machining: enhancing performance with vegetable oil-based nano cutting fluids / J.E. Manikanta, N. Ambhore, C. Nikhare, N.K. Gurajala,

Hari Krishna Ch // Discover Materials. – 2025. – Vol. 5. – P. 63. – DOI: 10.1007/s43939-025-00236-4.

2. A review on sustainable alternatives for conventional cutting fluid applications for improved machinability / D.J. Hiran Gabriel, M. Parthiban, I. Kantharaj, N. Beemkumar // Machining Science and Technology. – 2023. – Vol. 27 (2). – P. 157–207. – DOI: 10.1080/10910344.2023.2194966.

3. Application of nanofluids as cutting fluids in machining operations: A brief review / L. Ben Said, L. Kolsi, K. Ghachem, M. Almeshaal, C. Maatki // Applied Nanoscience. – 2023. – Vol. 13 (6). – P. 4247–4278. – DOI: 10.1007/s13204-021-02140-8.

4. Analysis of machining performance in turning with trihybrid nanofluids and minimum quantity lubrication / J.E. Manikanta, M. Abdullah, N. Ambhore, T.K. Kotteda // Scientific Reports. – 2025. – Vol. 15 (1). – DOI: 10.1038/s41598-025-97039-7.

5. Investigation on machinability and sustainability aspects during hard turning under GO nanofluid MQL environment for precision and cleaner manufacturing / S. Khatai, A.K. Sahoo, R. Kumar, A. Panda // Precision Engineering. – 2025. – Vol. 95. – P. 379–408. – DOI: 10.1016/j.precisioneng.2025.05.006.

6. Nanoparticle-based cutting fluids in drilling: A recent review / A. Adil, T. Baig, F. Jamil, M. Farhan, M. Shehryar, H.M. Ali, S. Khushnood // The International Journal of Advanced Manufacturing Technology. – 2024. – Vol. 131 (5). – P. 2247–2264. – DOI: 10.1007/s00170-023-11048-2.

7. Evaluation of new vegetable-based cutting fluids on thrust force and surface roughness in drilling of AISI 304 using Taguchi method / E. Kuram, B. Ozcelik, E. Demirbas, E. Şik, I.N. Tansel // Materials and Manufacturing Processes. – 2011. – Vol. 26 (9). – P. 1136–1146. – DOI: 10.1080/10426914.2010.536933.

8. Influence of graphene nanosheets on thermo-physical and tribological properties of sustainable cutting fluids for MQL application in machining processes / V. Baldin, L.R.R. da Silva, R.V. Gelamo, A.B. Iglesias, R.B. da Silva, N. Khanna, A. Rocha Machado // Lubricants. – 2022. – Vol. 10 (8). – DOI: 10.3390/lubricants10080193.

9. An experimental evaluation of SiO_2 nano cutting fluids in CNC turning of aluminium alloy AL319 via MQL technique / A.M. Syafiq, A.A.M. Redhwan, A.A. Hazim, A.R.M. Aminullah, S.Z. Ariffin, W. Nughoro, A. Arifuddin, A.B.S. Hawa // IOP Conference Series: Materials Science and Engineering. – 2021. – Vol. 1068 (1). – P. 1–11. – DOI: 10.1088/1757-899X/1068/1/012009.

10. Shuang Y., John M., Songlin D. Experimental investigation on the performance and mechanism of graphene oxide nanofluids in turning Ti-6Al-4V // Journal of Manufacturing Processes. – 2019. – Vol. 43. – P. 164–174. – DOI: 10.1016/j.jmapro.2019.05.005.

11. *Emami M., Karimipour A.* Theoretical and experimental study of the chatter vibration in wet and MQL machining conditions in turning process // Precision Engineering. – 2021. – Vol. 72. – P. 41–58. – DOI: 10.1016/j.precisioneng.2021.04.006.
12. Sustainable turning of Inconel 718 nickel alloy using MQL strategy based on graphene nanofluids / L. Gong, R. Bertolini, A. Ghiotti, N. He, S. Bruschi // The International Journal of Advanced Manufacturing Technology. – 2020. – Vol. 108 (9). – P. 3159–3174. – DOI: 10.1007/s00170-020-05626-x.
13. *Makhesana M.A., Patel K.M.* Performance assessment of vegetable oil-based nanofluid in Minimum Quantity Lubrication (MQL) during machining of Inconel 718 // Advances in Materials and Processing Technologies. – 2022. – Vol. 8 (3). – P. 3182–3198.
14. *Kumar M.S., Krishna V.M.* An investigation on turning AISI 1018 steel with hybrid biodegradeable nanofluid/MQL incorporated with combinations of CuO-Al₂O₃ nanoparticles // Materials Today: Proceedings. – 2020. – Vol. 24. – P. 1577–1584. – DOI: 10.1016/j.matpr.2020.04.478.
15. Performance evaluation of vegetable oil based nano cutting fluids in machining using grey relational analysis – A step towards sustainable manufacturing / P. Rapeti, V.K. Pasam, K.M. Gurram, R.S. Revuru // Journal of Cleaner Production. – 2018. – Vol. 172. – P. 2862–2875. – DOI: 10.1016/j.jclepro.2017.11.127.
16. *Estellé P., Halefadi S., Maré T.* Thermophysical properties and heat transfer performance of carbon nanotubes water-based nanofluids // Journal of Thermal Analysis and Calorimetry. – 2017. – Vol. 127 (3). – P. 2075–2081. – DOI: 10.1007/s10973-016-5833-8.
17. An approach to cleaner production for machining hardened steel using different cooling-lubrication conditions / M. Mia, M.K. Gupta, G. Singh, G. Królczyk, D.Y. Pimenov // Journal of Cleaner Production. – 2018. – Vol. 187. – P. 1069–1081. – DOI: 10.1016/j.jclepro.2018.03.279.
18. *Berger Bioucas F.E., Koller T.M., Fröba A.P.* Effective thermal conductivity of nanofluids containing silicon dioxide, titanium dioxide, copper oxide, polystyrene, or polymethylmethacrylate nanoparticles dispersed in water, ethylene glycol, or glycerol // International Journal of Thermophysics. – 2025. – Vol. 46 (2). – DOI: 10.1007/s10765-024-03488-z.
19. *Padmini R., Krishna P.V., Mohana Rao G.K.* Experimental evaluation of nano-molybdenum disulphide and nano-boric acid suspensions in vegetable oils as prospective cutting fluids during turning of AISI 1040 steel // Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part J: Journal of Engineering Tribology. – 2016. – Vol. 230 (5). – P. 493–505. – DOI: 10.1177/1350650115601.
20. *Shrivastava A., Gangopadhyay S.* Evaluation of adequacy of lubricants in MQL micro-drilling by a developed analytical model and experiments // Journal of Manufacturing Processes. – 2023. – Vol. 8 (101). – P. 1592–1604. – DOI: 10.1016/j.jmapro.2023.07.017.
21. Influence of nano-minimum quantity lubrication with MoS₂ and CuO nanoparticles on cutting forces and surface roughness during grinding of AISI D2 steel / A. Azami, Z. Salahshournejad, E. Shakouri, A.R. Sharifi, P. Saraeian // Journal of Manufacturing Processes. – 2023. – Vol. 3 (87). – P. 209–220. – DOI: 10.1016/j.jmapro.2023.01.029.
22. *Sharma A.K., Tiwari A.K., Dixit A.R.* Effects of minimum quantity lubrication (MQL) in machining processes using conventional and nanofluid based cutting fluids: A comprehensive review // Journal of Cleaner Production. – 2016. – Vol. 2 (127), pp. 1–8. – DOI: 10.1016/j.jclepro.2016.03.146.
23. *Маниканта Д.Э., Амбхор Н., Теллапумта Г.Р.* Исследование СОЖ с использованием растительного масла, усиленного добавлением наночастиц, при токарной обработке // Обработка металлов (технология, оборудование, инструменты). – 2025. – Т. 27, № 1. – С. 20–33. – DOI: 10.17212/1994-6309-2025-27.1-20-33.
24. *Virdi R.L., Chatha S.S., Singh H.* Processing characteristics of different vegetable oil-based nanofluid MQL for grinding of Ni-Cr alloy // Advances in Materials and Processing Technologies. – 2022. – Vol. 8 (1). – P. 210–223. – DOI: 10.1007/s40684-018-0035-4.
25. Assessment of jojoba as a pure and nano-fluid base oil in minimum quantity lubrication (MQL) hard-turning of Ti–6Al–4V: A step towards sustainable machining / G. Gaurav, A. Sharma, G.S. Dangayach, M.L. Meena // Journal of Cleaner Production. – 2020. – Vol. 272. – DOI: 10.1016/j.jclepro.2020.122553.

Конфликт интересов

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.



Obrabotka metallov - Metal Working and Material Science

Journal homepage: http://journals.nstu.ru/obrabotka_metallov



Machining performance evaluation of eco-friendly copper oxide-based nanofluids in turning operations

Javvadi Eswara Manikanta^{1, a}, Nitin Ambhore^{2, b, *}, Krishna Birudugadda Murthy^{3, c}, Gopala Rao Thellaputta^{4, d}, Devendra Agrawal^{5, e}

¹ Department of Mechanical Engineering, Shri Vishnu Engineering College for Women (A), Bhimavaram, Andhra Pradesh, 534202, India

² Department of Mechanical Engineering, Vishwakarma Institute of Technology, SPPU, Maharashtra, Pune 411037, India

³ Department of Mechanical Engineering, Sasi Institute of Technology and Engineering, Tadepalligudem, 534101, India

⁴ Department of Mechanical Engineering, St. Ann's College of Engineering & Technology (Autonomous), Chirala, Andhra Pradesh, 523187, India

⁵ Department of Mechanical Engineering, College of Engineering, Malegaon (Bk), Baramati, Maharashtra, Pune 413115, India

^a <https://orcid.org/0000-0002-0881-4899>, manijem66@gmail.com; ^b <https://orcid.org/0000-0001-8468-8057>, nitin.ambhore@vit.edu;

^c <https://orcid.org/0009-0007-4457-0266>, bkmurthy@sasi.ac.in; ^d <https://orcid.org/0000-0001-5622-4140>, drtgopalarao@gmail.com;

^e <https://orcid.org/0000-0002-2477-1841>, dpagrawal@engg.svpm.org.in

ARTICLE INFO

Article history:

Received: 22 July 2025

Revised: 22 August 2025

Accepted: 09 September 2025

Available online: 15 December 2025

Keywords:

Copper oxide

Nanofluid

High-speed turning

Minimum quantity lubrication (MQL)

Environmental sustainability

ABSTRACT

Introduction. There is a growing demand for eco-friendly cutting fluids in machining due to their non-toxicity, sustainability, high performance, and ability to improve surface quality. These fluids support green manufacturing practices and promote a safe working environment. Copper oxide-based nanofluids offer the combined benefits of enhanced heat transfer, increased safety, and reduced tool wear and cutting forces. **The purpose of the work.** This research focuses on evaluating the performance of copper oxide-based cutting fluids in turning processes to support sustainable and eco-conscious manufacturing. The study investigates the turning of SS 304 steel using varying concentrations of copper oxide nanofluids. **The methods of investigation.** In this study, the turning process was tested under various machining conditions using different concentrations of copper oxide nanoparticles (0.3 %, 0.6 %, 0.9 %, 1.2 %, and 1.5 %). Corn oil was selected as the base oil, and the copper oxide nanoparticles were dispersed in the corn oil to prepare the nanofluid. Machining trials were conducted under different lubrication environments: dry, wet, minimum quantity lubrication (*MQL*), and nano-enhanced *MQL* (*nMQL*). A comparative study was performed to assess cutting temperature and cutting forces. **Results and discussion.** The results showed that the use of 1.2 % copper oxide nanofluid led to significant reductions in cutting force and cutting temperature, by approximately 17.54 % and 29.53 %, respectively, compared to traditional dry and wet machining environments. Furthermore, the nanofluid was observed to form a protective film at the tool-workpiece interface, reducing tool wear. These findings highlight the potential of copper oxide-based green cutting fluids to improve turning operation efficiency and promote environmentally sustainable practices.

For citation: Manikanta J.E., Ambhore N., Murthy K.B., Thellaputta G.R., Agrawal D. Machining performance evaluation of eco-friendly copper oxide-based nanofluids in turning operations. *Obrabotka metallov (tekhnologiya, oborudovanie, instrumenty) = Metal Working and Material Science*, 2025, vol. 27, no. 4, pp. 6–15. DOI: 10.17212/1994-6309-2025-27.4-6-15. (In Russian).

References

1. Manikanta J.E., Ambhore N., Nikhare C., Gurajala, N.K., Ch. H.K. Sustainable machining: enhancing performance with vegetable oil-based nano cutting fluids. *Discover Materials*, 2025, vol. 5, p. 63. DOI: 10.1007/s43939-025-00236-4.
2. Hiran Gabriel D.J., Parthiban M., Kantharaj I., Beemkumar N. A review on sustainable alternatives for conventional cutting fluid applications for improved machinability. *Machining Science and Technology*, 2023, vol. 27 (2), pp. 157–207. DOI: 10.1080/10910344.2023.2194966.

* Corresponding author

Ambhore Nitin, Ph.D. (Engineering), Assistant Professor

Vishwakarma Institute of Technology,
Pune - 411037, Maharashtra, India

Tel.: +91-2026950441, e-mail: nitin.ambhore@vit.edu

3. Ben Said L., Kolsi L., Ghachem K., Almeshaal M., Maatki C. Application of nanofluids as cutting fluids in machining operations: A brief review. *Applied Nanoscience*, 2023, vol. 13 (6), pp. 4247–4278. DOI: 10.1007/s13204-021-02140-8.
4. Manikanta J.E., Abdullah M., Ambhore N., Kotteda T.K. Analysis of machining performance in turning with trihybrid nanofluids and minimum quantity lubrication. *Scientific Reports*, 2025, vol. 15 (1). DOI: 10.1038/s41598-025-97039-7.
5. Khatai S., Sahoo A.K., Kumar R., Panda A. Investigation on machinability and sustainability aspects during hard turning under GO nanofluid MQL environment for precision and cleaner manufacturing. *Precision Engineering*, 2025, vol. 95, pp. 379–408. DOI: 10.1016/j.precisioneng.2025.05.006.
6. Adil A., Baig T., Jamil F., Farhan M., Shehryar M., Ali H.M., Khushnood S. Nanoparticle-based cutting fluids in drilling: A recent review. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 2024, vol. 131 (5), pp. 2247–2264. DOI: 10.1007/s00170-023-11048-2.
7. Kuram E., Ozcelik B., Demirbas E., Şik E., Tansel I.N. Evaluation of new vegetable-based cutting fluids on thrust force and surface roughness in drilling of AISI 304 using Taguchi method. *Materials and Manufacturing Processes*, 2011, vol. 26 (9), pp. 1136–1146. DOI: 10.1080/10426914.2010.536933.
8. Baldin V., da Silva L.R., Gelamo R.V., Iglesias A.B., da Silva R.B., Khanna N., Rocha Machado A. Influence of graphene nanosheets on thermo-physical and tribological properties of sustainable cutting fluids for MQL application in machining processes. *Lubricants*, 2022, vol. 10 (8). DOI: 10.3390/lubricants10080193.
9. Syafiq A.M., Redhwan A.A., Hazim A.A., Aminullah A.R., Ariffin S.Z., Nugoro W., Arifuddin A., Hawa A.B. An experimental evaluation of SiO_2 nano cutting fluids in CNC turning of aluminium alloy AL319 via MQL technique. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*, 2021, vol. 1068 (1), pp. 1–11. DOI: 10.1088/1757-899X/1068/1/012009.
10. Shuang Y., John M., Songlin D. Experimental investigation on the performance and mechanism of graphene oxide nanofluids in turning Ti-6Al-4V. *Journal of Manufacturing Processes*, 2019, vol. 43, pp. 164–174. DOI: 10.1016/j.jmapro.2019.05.005.
11. Emami M., Karimpour A. Theoretical and experimental study of the chatter vibration in wet and MQL machining conditions in turning process. *Precision Engineering*, 2021, vol. 72, pp. 41–58. DOI: 10.1016/j.precisioneng.2021.04.006.
12. Gong L., Bertolini R., Ghiotti A., He N., Bruschi S. Sustainable turning of Inconel 718 nickel alloy using MQL strategy based on graphene nanofluids. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 2020, vol. 108 (9), pp. 3159–3174. DOI: 10.1007/s00170-020-05626-x.
13. Makhesana M.A., Patel K.M. Performance assessment of vegetable oil-based nanofluid in Minimum Quantity Lubrication (MQL) during machining of Inconel 718. *Advances in Materials and Processing Technologies*, 2022, vol. 8 (3), pp. 3182–3198.
14. Kumar M.S., Krishna V.M. An investigation on turning AISI 1018 steel with hybrid biodegradeable nanofluid/MQL incorporated with combinations of $\text{CuO}-\text{Al}_2\text{O}_3$ nanoparticles. *Materials Today: Proceedings*, 2020, vol. 24, pp. 1577–1584. DOI: 10.1016/j.matpr.2020.04.478.
15. Rapeti P., Pasam V.K., Gurram K.M., Revuru R.S. Performance evaluation of vegetable oil based nano cutting fluids in machining using grey relational analysis – A step towards sustainable manufacturing. *Journal of Cleaner Production*, 2018, vol. 172, pp. 2862–2875. DOI: 10.1016/j.jclepro.2017.11.127.
16. Estellé P., Halelfadl S., Maré T. Thermophysical properties and heat transfer performance of carbon nanotubes water-based nanofluids. *Journal of Thermal Analysis and Calorimetry*, 2017, vol. 127 (3), pp. 2075–2081. DOI: 10.1007/s10973-016-5833-8.
17. Mia M., Gupta M.K., Singh G., Królczyk G., Pimenov D.Y. An approach to cleaner production for machining hardened steel using different cooling-lubrication conditions. *Journal of Cleaner Production*, 2018, vol. 187, pp. 1069–1081. DOI: 10.1016/j.jclepro.2018.03.279.
18. Berger Bioucas F.E., Koller T.M., Fröba A.P. Effective thermal conductivity of nanofluids containing silicon dioxide, titanium dioxide, copper oxide, polystyrene, or polymethylmethacrylate nanoparticles dispersed in water, ethylene glycol, or glycerol. *International Journal of Thermophysics*, 2025, vol. 46 (2). DOI: 10.1007/s10765-024-03488-z.
19. Padmini R., Krishna P.V., Mohana Rao G.K. Experimental evaluation of nano-molybdenum disulphide and nano-boric acid suspensions in vegetable oils as prospective cutting fluids during turning of AISI 1040 steel. *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part J: Journal of Engineering Tribology*, 2016, vol. 230 (5), pp. 493–505. DOI: 10.1177/1350650115601.

20. Shrivastava A., Gangopadhyay S. Evaluation of adequacy of lubricants in MQL micro-drilling by a developed analytical model and experiments. *Journal of Manufacturing Processes*, 2023, vol. 8 (101), pp. 1592–1604. DOI: 10.1016/j.jmapro.2023.07.017.
21. Azami A., Salahshournejad Z., Shakouri E., Sharifi A.R., Saraeian P. Influence of nano-minimum quantity lubrication with MoS₂ and CuO nanoparticles on cutting forces and surface roughness during grinding of AISI D2 steel. *Journal of Manufacturing Processes*, 2023, vol. 3 (87), pp. 209–220. DOI: 10.1016/j.jmapro.2023.01.029.
22. Sharma A.K., Tiwari A.K., Dixit A.R. Effects of minimum quantity lubrication (MQL) in machining processes using conventional and nanofluid based cutting fluids: A comprehensive review. *Journal of Cleaner Production*, 2016, vol. 2 (127), pp. 1–8. DOI: 10.1016/j.jclepro.2016.03.146.
23. Manikanta J.E., Ambhore N., Thellaputta G.R. Investigation of vegetable oil-based cutting fluids enhanced with nanoparticle additions in turning operations. *Obrabotka metallov (tekhnologiya, oborudovanie, instrumenty) = Metal Working and Material Science*, 2025, vol. 27, no. 1, pp. 20–33. DOI: 10.17212/1994-6309-2025-27.1-20-33.
24. Virdi R.L., Chatha S.S., Singh H. Processing characteristics of different vegetable oil-based nanofluid MQL for grinding of Ni-Cr alloy. *Advances in Materials and Processing Technologies*, 2022, vol. 8 (1), pp. 210–223. DOI: 10.1007/s40684-018-0035-4.
25. Gaurav G., Sharma A., Dangayach G.S., Meena M.L. Assessment of jojoba as a pure and nano-fluid base oil in minimum quantity lubrication (MQL) hard-turning of Ti–6Al–4V: A step towards sustainable machining. *Journal of Cleaner Production*, 2020, vol. 272. DOI: 10.1016/j.jclepro.2020.122553.

Conflicts of Interest

The authors declare no conflict of interest.

© 2025 The Authors. Published by Novosibirsk State Technical University. This is an open access article under the CC BY license (<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0>).